

## STATUS REPORT OF KART PROJECT

M. Tanigaki<sup>\*A)</sup>, K. Mishima<sup>A)</sup>, S. Shiroya<sup>A)</sup>  
Y. Mori<sup>B)</sup>, S. Machida<sup>B)</sup>, Y. Ishi<sup>C)</sup>, S. Fukumoto<sup>C)</sup>  
M. Inoue<sup>D)</sup>

A) Research Reactor Institute, Kyoto University  
2-1010 Asashiro-nishi, Kumatori, Osaka, 590-0494

B) Accelerator Laboratory, KEK  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

C) Energy and Industrial Systems Center, Mitsubishi Electric Corporation  
1-1-2 wadasaki-cho, Hyogo-ku, Kobe 652-8555

D) Synchrotron Light Life Science Center, Ritsumeikan University  
1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577

### Abstract

Kumatori Accelerator driven Reactor Test project (KART) has been started at Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI) from the fiscal year of 2002, aiming to demonstrate the basic feasibility of ADS (Accelerator Driven Sub-critical system) and to develop an 150 MeV proton FFAG (Fixed Field Alternating Gradient) accelerator complex as a neutron production driver. This FFAG complex will be connected with our Kyoto University Critical Assembly (KUCA) for the basic ADS experiments by the end of March 2006.

## KARTプロジェクトの現状

### 1. はじめに

現在京都大学で稼働中の5 MW 原子炉の後継中性子源として、1996年に加速器駆動未臨界炉による中性子源が提案された。<sup>[1]</sup> MCNPXを用いた加速器駆動未臨界炉の概念設計を進めたところ、特に陽子エネルギーが20~150 MeVの領域で実効増倍係数 $k_{eff}$ の見積りに必要な核データや計算コードの精度が十分でない事が明らかになってきた。また京大原子炉実験所では実験所の臨界集合体(KUCA)と300 kV コッククロフト型加速器で基礎実験を行ってきた<sup>[2,3]</sup>が、ここでは14 MeVの単色中性子しか得られず、必要なデータや計算コードの精度向上の妨げになっていた。

加速器駆動未臨界炉のための陽子ビーム源には1) 高いビーム強度 2) 省電力 3) 高い安定性が求められる。大河によって40年前に提唱されたFFAG原理に基づく加速器<sup>[4]</sup>はこれらの条件を満たす可能性を秘めているが、広帯域・高電圧の加速空洞がないこと、ビームの入出射に必要なスペースが確保できない事が妨げとなっていた。最近になって森らがFINMETを用いた広帯域高電圧加速空洞を開発<sup>[5]</sup>し、500 keVのFFAG実証器で陽子加速に成功<sup>[6]</sup>した。また“yoke-free”マグネットの開発も行われ、これを用いた陽子150 MeV FFAG加速器の製作が進行中<sup>[7]</sup>である。

このようにFFAGがADSの陽子ビーム源として実用化できる素地が整ってきた事をうけ、KARTプロジェクトが文部科学省によって採用され2002年より開始された。このプロジェクトでは最近の技術開発を元にして150 MeV陽子FFAG加速器の開発をするこ

と、及びこの加速器とKUCAを組み合わせ陽子エネルギー20~150 MeVの領域での実効増倍係数決定に必要な核データや炉物理の実験を行う事である。ここではKARTプロジェクトの現状について、現在製作中のFFAG加速器を中心に紹介する。

### 2. FFAG加速器の構成と各部の概要

今回のKARTプロジェクトでは、入射器、ブースタ、主加速器の3段構成となり、全てがFFAG加速器である。うち入射器が誘導加速を採用したスパイラルセクタ型のFFAG、残りがRF加速によるラディアルセクタ型FFAGである。今回のFFAG加速器群の構成と配置を図1と図2に、仕様を表1にまとめる。

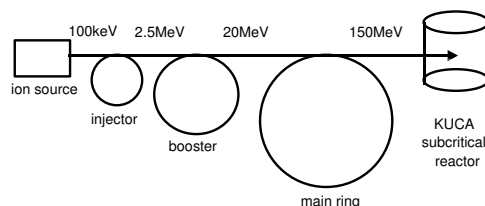


図1: 京大炉でのFFAG加速器の構成。

#### 2.1 イオン源

イオン源は典型的な体積カスプ型イオン源を採用している。ここで発生させた $H^+$ イオンは100 keVまで加速され入射器へと向かう。今回のFFAGはパル

\* E-mail: tanigaki@rri.kyoto-u.ac.jp

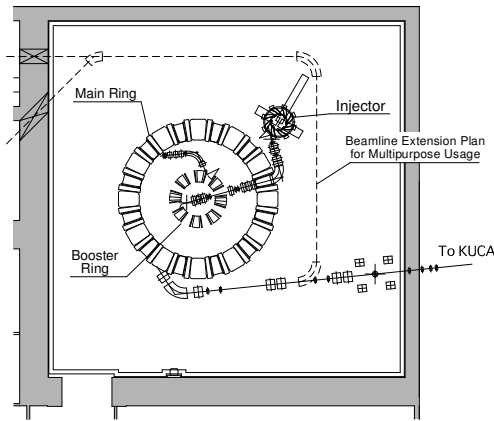


図 2: FFAG 加速器の配置図。

表 1: FFAG 加速器の仕様。

	Injector	Booster	Main
Focusing	Spiral	Radial	Radial
Acceleration	Induction	RF	RF
$k$	2.5	4.5	7.6
$E_{inj}$	100 keV	2.5 MeV	20 MeV
$E_{ext}$	2.5 MeV	20 MeV	150 MeV
$p_{ext} / p_{inj}$	5.00	2.84	2.83
$r_{inj}$	0.60 m	1.42 m	4.54 m
$r_{ext}$	0.99 m	1.71 m	5.12 m

スモードで動くため、イオン源のアーク電圧も 10% のデューティでパルスして効率化をはかっている。入射器への輸送ビームラインの途中には静電チョップが置かれ、このチョップで  $\sim 50\mu\text{s}$  にパルスを整えた上で次段に入射させる。

## 2.2 誘導加速型 FFAG 入射器

入射器には 2.5MeV の誘導加速型 FFAG 加速器を採用する。FFAG 磁場は 12 個のスパイラル型電磁石 (スパイラル角 42 度) で作られる。FFAG 磁場の  $k$  値はスパイラル型電磁石にそれぞれ 32 個取り付けられたコイルによって決定される。

この FFAG 加速器の誘導電圧のパターン (図 4) に示すとおり、イオン源から入射したビームバンチは  $5\mu\text{s}$  に圧縮されて出射される。

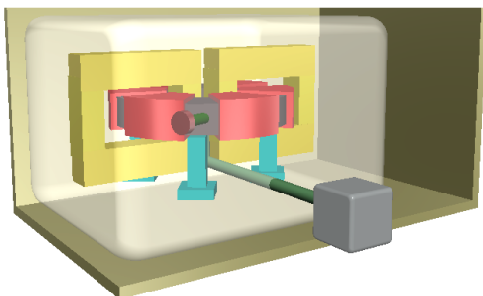


図 3: FFAG 入射器の外観図。

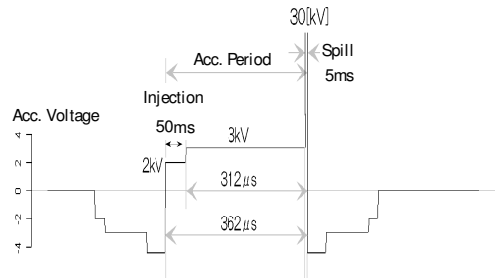


図 4: FFAG 入射器の加速電圧パターン。

## 2.3 RF 加速型ブースター FFAG

入射段から入射した陽子ビームは、このブースター段の FFAG 加速器で最大 20 MeV まで加速される。この FFAG 加速器はラディアルセクタ型で、8 組の発散-収束-発散電磁石からなる。この FFAG のラティスの構成を図 5 に示す。これらの電磁石は全て“ヨークフリー”タイプである。FFAG 磁場の  $k$  値はこの電磁石のおおのりに 22 個ずつ取り付けられたコイルを使って設定されるため、コイルの電流値を変える事で  $k$  値を変え、この段での加速エネルギーを可変とする事が可能になる。コイルの取り付けの様子を図 6 に示す。

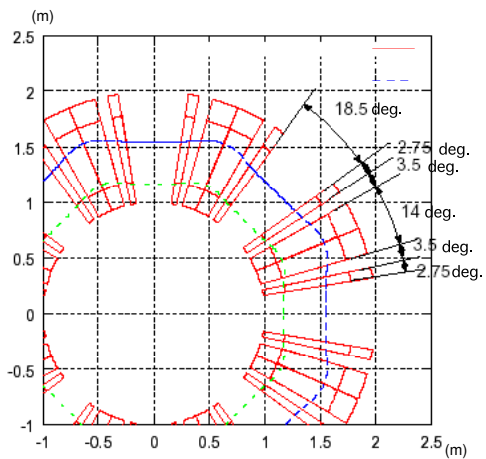


図 5: ブースター段の磁石の構成。緑と青の線はそれぞれ  $r_{inj}$  と  $r_{ext}$  に相当。

## 2.4 RF 加速型終段 FFAG

最終段の FFAG 加速器は RF 加速でラディアルセクタ型の FFAG 加速器である。基本的に KEK で開発中の 150 MeV 陽子 FFAG 加速器と同一である。詳細は [7] などを参照頂きたい。現状の FINEMET による加速空洞の出力電圧は  $\sim 10$  kV 程度であり、加速の繰り返し周期を 100 Hz 程度にあげる為には加速電圧が不足する。そこで高周波加速空洞を 2 つに増やした点異なる。また将来 200 MeV 加速の際に必要な磁場出力を得られるように、より透磁率の高い鉄をヨークに使っている点異なる。この加速器の電磁

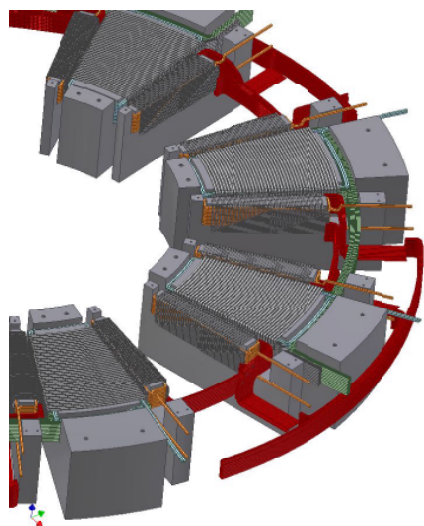


図 6: ブースター段の磁極面。  $k$  可変で FFAG 磁場をつくるため 22 個のトリムコイルが  $r$  方向に並べられている。

石も“ヨークフリー”タイプであるが、入射段やブースター段と異なり FFAG 磁場の  $k$  値は磁極の形状によって決定されている。参考の為、今回の電磁石と同形状の KEK の電磁石を図 7 に示す。



図 7: KEK 150MeV 陽子 FFAG 加速器の電磁石。京大炉の終段 FFAG のものはこれと同型になる予定である。

### 3. 現状と今後の予定

KUCA に隣接する場所に、FFAG 加速器を収める予定の“イノベーションリサーチラボ”の建設が 2004 年 3 月末に完了した。この建物は FFAG 加速器の設置の他に、加速器からのビームを物理、化学、医学、材料その他の分野で利用する多目的利用のための拠点となる予定である。

加速器本体については、現在イオン源本体等が三菱電機工場内で試験調整中である。2004 年の秋にイノベーションリサーチラボに搬入され、組立後運転試験を行う予定である。現在終段加速器とブースター段の電磁石の設計製作が進んでおり、2005 年前半に搬入・組立が行われる予定である。2005 年秋以降に KUCA とビームラインで結ばれて加速器駆動未臨界

炉に関する基礎研究を開始する予定である。

### 参考文献

- [1] K. Kawase and M. Inoue, “Neutron Factory Project at KURRI”, APAC 1998, Tsukuba, Japan, p. 104
- [2] S. Shiroya, H. Unesaki et al., “Neutronics of Future Neutron Source Based on Accelerator Driven Subcritical Reactor Concept in Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI)”, Int. Seminar on Advanced Nucl. Energy Systems toward Zero Release of Radioactive Wastes, 2nd Fujiwara Int. Seminar, Nov. 6-9, 2000, Shizuoka, Japan, Abstracts p. 58.
- [3] S. Shiroya, H. Unesaki et al., Trans. Am. Nucl. Soc., 2001 Annu. Mtg., June 17-21, 2001, Milwaukee, Wisconsin, p. 78.
- [4] T. Ohkawa, Proc. of annual meeting of JPS(1953)
- [5] Y. Mori et al., “A new type of rf cavity for high intensity proton synchrotron using high permeability magnetic alloy”, EPAC 1998, p. 299.
- [6] M. Aiba et al., “DEVELOPMENT OF A FFAG PROTON SYNCHROTRON”, Proceeding of EPAC 2000, Vienna, Austria, p. 581
- [7] T. Adachi et al., “A 150MeV FFAG SYNCHROTRON WITH ” RETURN-YOKE FREE ” MAGNET”, PAC 2001, Chicago, the United States, p. 3254
- [8] M. Aiba et al., “Beam Injection and Extraction in 150 MeV FFAG”, Proceeding of EPAC 2002, Paris, France, p. 1076